

# ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РОЛИКОВОГО УЩІЛЬНЕННЯ

S. ZAICHENKO, S. SHEVCHUK, V. GARNETS

## ENERGY ANALYSIS OF ROLLER COMPACTION

**Анотація.** Сучасне будівельне обладнання витрачає велику кількість енергії. Для вибору методу формування одним з можливих критеріїв може виступати відношення необхідної і витраченої енергії. Необхідна енергія складається з енергії на просторову зміну скелету і енергії руйнування зв'язків між зернами цементного гелю. Суміш розглядається як дисперсне середовище, яке представлено шарами різного розміру. Нормальні і дотичні складові взаємодії часток пов'язані законом Кулона-Амонтона. Для ущільненої суміші найбільш схожою за розташуванням часток є гексагональна упаковка. Представлено формулу зміни пористості суміші від взаємної орієнтації часток.

Створена математична модель процесу ущільнення будівельної суміші, що дозволяє визначити питому енергію процесів, які безпосередньо відбуваються в об'ємі полідисперсного середовища, що оброблюється.

**Ключові слова:** енергія, суміш, ущільнення, формування, тертя.

**Аннотация.** Современное строительное оборудование тратит большое количество энергии. Для выбора метода формирования одним из возможных критериев может выступать отношение необходимой и затраченной энергии. Необходимая энергия складывается из энергии на пространственную изменение скелета и энергии разрушения связей между зернами цементного геля. Смесь рассматривается как дисперсную среду, которое представлено слоями различного размера. Нормальные и касательные составляющие взаимодействия частиц связаны законом Кулона-Амонтона. Для уплотненной смеси наиболее похожей по расположению частиц является гексагональная упаковка. Представлено формулу изменения пористости смеси от взаимной ориентации частиц.

Создана математическая модель процесса уплотнения строительной смеси, которая позволяет определить удельную энергию процессов, непосредственно происходящих в объеме полидисперсной обрабатываемой среды.

**Ключевые слова:** энергия, смесь, уплотнение, формирование, трение.

**Annotation.** Modern construction equipment spends a lot of energy. To select a method of forming one of the possible criteria may be a necessary attitude and energy expended. The required energy is the sum of the energy on the spatial variation of the skeleton and fracture energy ties between the grains of the cement gel. The mixture was treated as a disperse medium, which is represented by layers of different sizes. The normal and tangential components of the interaction of the particles are related by the Coulomb-Amontons. For a compacted mixture of the most similar in arrangement of the particles is hexagonal packing. Presented by the formula changes the porosity of the mixture from the relative orientation of the particles.

A mathematical model of the compaction process of building mixtures, which allows to determine the specific energy of the processes occurring directly in the volume of processed disperse medium.

**Key words:** the energy mix, seal, forming, friction.

### Проблема і її зв'язок з науковими і практичними результатами

Сучасні бетоноформуючі вібраційні і безвібраційні машини являють собою високопродуктивне обладнання з високими витратами енергії. Проте питанню ефективного використання енергії бетоноформуючими машинами приділено недостатньо уваги. Це в значною мірою пояснюється недостатньо коректним підходом до створення моделі процесу, насамперед – ущільнення, яка б урахувала витрати питомої енергії у відповідності до стану бетонної суміші. Досить часто в розрахунках для моделювання використовується завершу вальний процес з урахуванням пружних (або квазіпружних) констант[1]

Основою процесів ущільнення будівельних сумішей є перетворення енергії, яка передається від робочих органів бетоноформуючих машин середовищу. Для випадків вібраційного ущільнення створено достатньо коректні розрахункові методики [2], які дають можливість визначити енергетичні витрати. Проте використання вібраційних технологій обмежуються показниками жорсткості суміші, що пов'язано з витратами цементу. Разом з тим, застосування безвібраційної роликової технології дозволяє суттєво підвищити жорсткість бетонної суміші, покращити умови праці, створити умови для автоматизації процесу. Середовище (у випадку роликового формування) – жорстка будівельна суміш, сприймаючи енергію від робочих органів, якісно змінюється, витрачаючи енергію на подолання структурних зв'язків між частинками суміші. Механізм передачі енергії і розподіл енергії в об'ємі середовищу, що оброблюється, визначається

способом формування. Передача енергії суміші різними шляхами призводить до різної кількості енергетичних втрат при досягненні необхідного ступеня ущільнення.

#### Аналіз досліджень і публікацій

Найбільш наближена до теми дослідження робота [3], яка розглядає енергетичні перетворення будівельних процесів, зокрема процесу ущільнення при відомому значенні витрат енергії на масу середовища, яке обробляється, що унеможливує аналіз ефективності використання енергії.

#### Постановка завдання

Для визначення енергетичної ефективності процесу ущільнення будівельних сумішей необхідно визначити питому енергію процесів, які безпосередньо відбуваються в об'ємі полідисперсного середовища, що обробляється.

#### Виклад матеріалу і результати

Критерієм енергетичної ефективності роботи ущільнюючої машини або процесу, який вона використовує, є коефіцієнт корисної дії. Коефіцієнт корисної дії процесу роликового формування  $\eta$  є відношення енергії, яка витрачається на зближення часток суміші  $E_1$  до енергії, яка витрачається на пересування роликових робочих органів  $E_2$ :

$$\eta = \frac{E_1}{E_2} 100. \quad (1)$$

Енергію на пересування роликових робочих органів  $E_2$  можливо визначити як роботу на подолання опору перекочування по середовищу, яке обробляється. Визначенню опору перекочування присвячено ряд робіт [4-6], де зусилля і момент на перекочування робочих органів знаходять шляхом вирішення контактної задачі.

При роликовому формуванні енергія  $E_1$  складається з:

- 1) енергії, яка витрачається на просторову зміну скелету, утвореному зернами заповнювача, що забезпечує ущільнення і надання необхідної форми;
- 2) енергії, яка витрачається на руйнування зв'язків між зернами цементного гелю.

Розглянувши характер структурних зв'язків між частинками, які утворюють скелет суміші, можливо визначити сили взаємодії між ними, які виникають під час ущільнення. Скелет будівельної суміші складеться з зерен крупного заповнювача, які зв'язані з цементним гелем і дрібним заповнювачем адгезійними силами [7]. Слід відзначити, що адгезійні сили проявляють себе в більшій мірі для заповнювачів з більшою питомою поверхнею. Для жорстких будівельних сумішей відбувається вирівнювання поверхні заповнювача з зменшенням і обертанням кривизни (рис. 1).

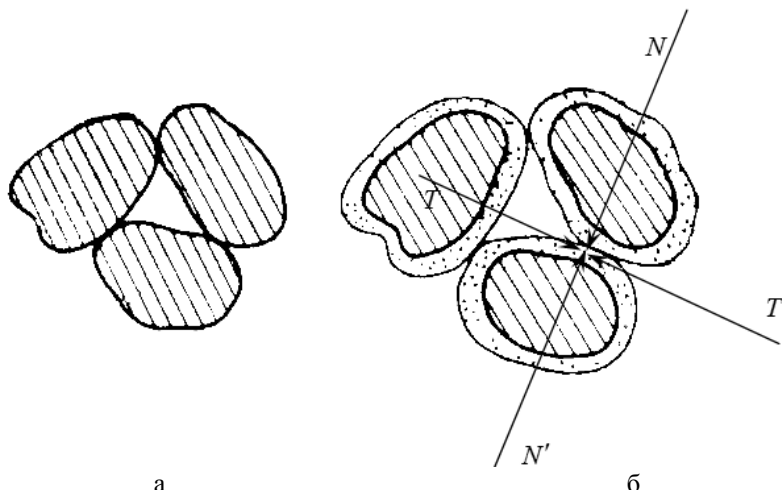


Рис. 1. Зерна заповнювача до (а) і після (б) процесу приготування будівельної суміші

Таким чином, як для випадку зміни макроструктури, яка представлена заповнювачем, так і для випадку мікроструктури, яка представлена частинками цементу і піску, відбувається взаємне їх переміщення, зсув. При зсуві однієї частинки відносно іншої їх взаємодію можливо представити

результуючими, які поділяються на пари ортогональних сил: сили  $N, N'$  - нормальні складові, які прикладені до точки контакту і направлена паралельно спільній нормалі і сили  $T, T'$  - дотичною складовою, яка прикладена до точки контакту і паралельна спільній дотичній. Сили  $N, N'$  викликані процесом стискання часток скелету, а  $T, T'$  - викликані тертям часток.

У загальному випадку тертя між частинками суміші викликано взаємодією нерівностей поверхонь і вандервальсовими силами. Вміст води для жорстких будівельних сумішей складає менше 10% , що відповідає умовам практично повної адсорбції води частинками при процесі перемішування[8]. Тому для будівельних сумішей більшою мірою характерне сухе тертя між твердими компонентами, що дозволяє зв'язати нормальні  $N, N'$  і дотичні складові результуючої взаємодії часток законом Кулона-Амонтона:

$$T = \mu' N ; T' = \mu' N' ,$$

де  $\mu'$  - коефіцієнт взаємного тертя часток суміші.

Енергія на подолання сил тертя:

$$E_t = \int \vec{T}(\vec{r}) d\vec{r} , \quad (2)$$

де  $\vec{T}(\vec{r})$  - сила тертя, яка залежить від координати прикладення сили;

$\vec{r}$  - радіус - вектор прикладення сили.

Для випадку розташування часток, представленому на рис. 2, подальше ущільнення суміші можливе лише за рахунок взаємного обертання часток. При повороті частинка повинна мати зовнішній дотичний вплив, який може перебороти при наявності однакових нормальних сил всі дотичні сили викликані тертям в точках контакту з іншими частинками, що малоймовірно. Тому для процесу ущільнення характерна взаємодія більшої кількості часток.

Для прикладу більшої кількості часток, які взаємодіють між собою, розглянемо взаємодію чотирьох часток суміші, які з врахуванням зменшення і обернення кривизни представимо у вигляді шарів однакового діаметра  $D$  (рис. 2).

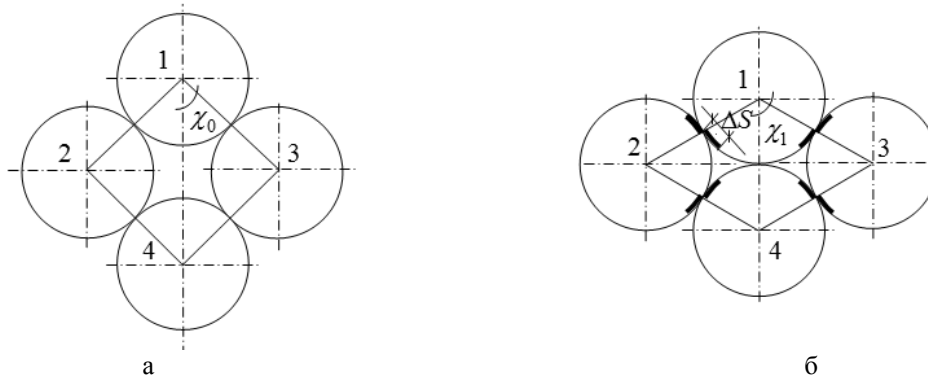


Рис. 2. Схеми рихлого (а) і ущільненого (б) стану суміші

При розгляді можливих варіантів укладки шарів, гексагональна упаковка, при, якій кут  $\chi_1 = 60^\circ$  відповідає найбільш ущільненому стану суміші з кінцевою пористістю  $\varepsilon_1$  (рис 2, б). Упаковка при, якій кут  $\chi_0 = 45^\circ$  відповідає найбільш рихлому стану суміші з початковою пористістю  $\varepsilon_0$  (рис 2, а). Таким чином, при ущільненні кут  $\chi$  змінюється з  $45^\circ$  до  $60^\circ$  за рахунок відносного переміщення шарів. Теоретичний коефіцієнт пористості:

$$\varepsilon_s = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot \sin(2 \cdot \chi)} .$$

Для випадку найбільш рихлого розташування часток  $\chi_0 = 45^\circ$  розрахункове значення пористості становить  $1 - \frac{\pi}{4}$ , а для випадку найбільш ущільненого стану суміші  $\chi_1 = 60^\circ$  розрахункове значення пористості  $1 - \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \pi$ .

Слід відзначити, що дійсне значення пористості найбільш рихлого стану будівельних сумішей становить 0,35-0,4. Процес роликового формування дозволяє ущільнювати будівельні суміші з високими значеннями коефіцієнта ущільнення 0,98-0,99, що відповідає пористості 0,02-0,01. Тобто, в розглянутому випадку, коли частинки максимально наближені одна до одної  $\chi_1 = 60^\circ$ . Така розбіжність пояснюється двома обставинами:

- проміжок між частинками заповнюється дрібним заповнювачем;
- форма часток лише частково наближена до сферичної.

Для приведення у відповідність представлену формулу скористаємось поправочним коефіцієнтом форми:

$$K_\varepsilon = e^{a_\varepsilon \frac{24\chi}{7\pi}},$$

де  $a_\varepsilon$  - емпіричний коефіцієнт.

Таким чином, при ущільненні кут  $\chi$  змінюється з  $45^\circ$  до  $60^\circ$  шляхом відносного переміщення шарів. Довжина траєкторії точки контакту шарів дорівнює дузі між кутами, які відповідають початковому  $\chi_0$  кінцевому положенню  $\chi_1$  часточки:

$$\Delta S = D/2(\chi_1 - \chi_0).$$

Прирошення траєкторії  $dr$ :

$$dr = D/2 d\chi. \quad (3)$$

Визначимо сили тертя  $T, T'$ , які виникають при взаємному переміщенні часток під час ущільнення з умови рівноваги системи (рис. 3). Також для спрощення рішення приймемо умови симетричності навантаження:

$$T(\chi) = T'(\chi) = \frac{\mu' N_2}{\sin \chi - \mu \sin \chi}. \quad (4)$$

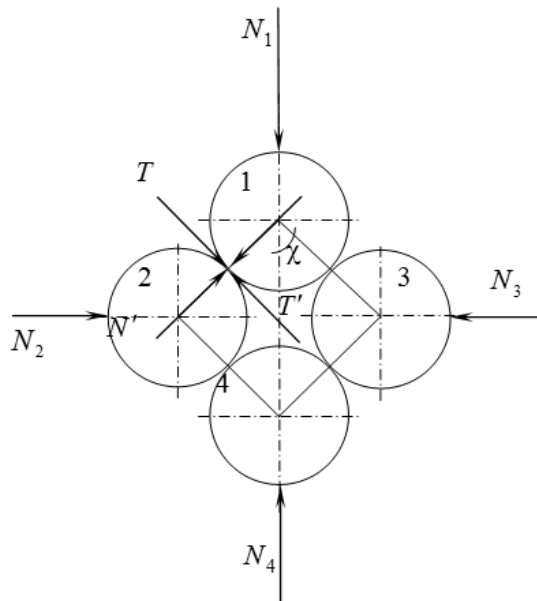


Рис. 3. Механізм дії сил в суміші

Сила  $N_2$  представляє собою опір переміщенню куль 2 і 3 в середовищі і може бути визначена, як добуток площі перетину частинки на опір стисненню будівельної суміші  $\sigma(\varepsilon)$  на різних етапах ущільнення:

$$N_2 = \pi \frac{D_i^2}{4} \cdot \sigma(\varepsilon).$$

Аналіз експериментальних кривих (рис. 4), які встановлюють залежність між пористістю і опором занурювання сферичного індентора свідчить, про експоненціальний характер залежностей, які можливо представити наступною регресією:

$$\sigma(\varepsilon) = a \cdot e^{b(1-\varepsilon)} + c,$$

де  $a, b, c$  - члени експоненціальної регресії.

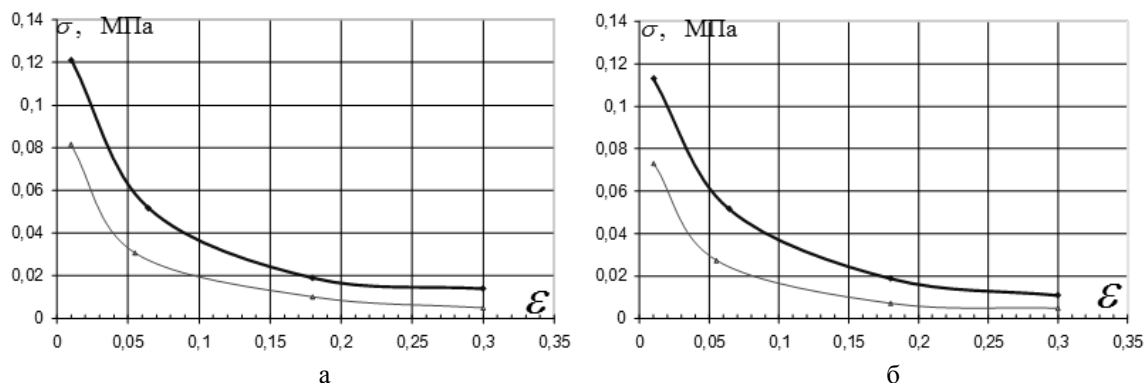


Рис 4. Залежності граничних напружень занурювання сферичного індентора радіусом 20мм (а) і 10 мм (б) при різних значеннях вологості суміші:

— - вологість 6%; - - - - - вологість 12%

Шляхом підстановки значення для сил тертя (4) і траєкторії руху (3) у вираз (2) отримаємо вираз для визначення енергії, необхідної для наближення чотирьох часток суміші:

$$E_{D_i} = \int_{\chi_0}^{\chi_1} \frac{\mu' \left( a \cdot e^{b \left( 1 - e^{\frac{a\varepsilon}{1-e} \frac{24\chi}{7\pi} \left( 1 - \frac{\pi}{4\sin(2\chi)} \right) \right)} + c \right)}{\sin \chi - \mu \sin \chi} D_i / 2 d\chi.$$

Для визначення енергії ущільнення для певного об'єму суміші необхідно врахувати розподіл розмірів часток  $D_i$  і можливість взаємного ортогонального переміщення часток у об'ємі.

Для будівництва міських і промислових споруд використовують бетони з безперервним зерновим складом дрібного і крупного заповнювача [9]. У якості дрібного заповнювача використовують пісок середньої крупності з модулем крупності 1,5-2,5.

Аналіз графіків розподілу за крупністю для піску модулем крупності 2,1 (рис. 5) свідчить, що більша частина дрібного заповнювача знаходиться в розмірі 0,16-2,5 мм.

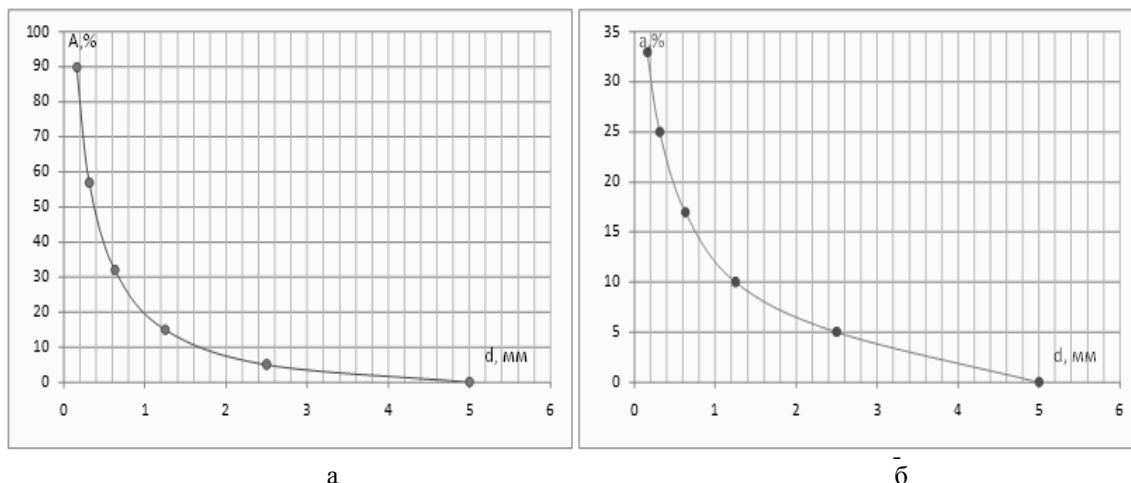


Рис. 5. Криві просіювання для піску з модулем крупності 2,5:  
а – повний залишок на ситі ; б - залишок на ситі

За прийнятими нормами ГОСТ 8267-93 розподіл крупності щебеню регламентовано повними залишками і для фракції 10-20мм представлено у вигляді графіка (рис. 6).

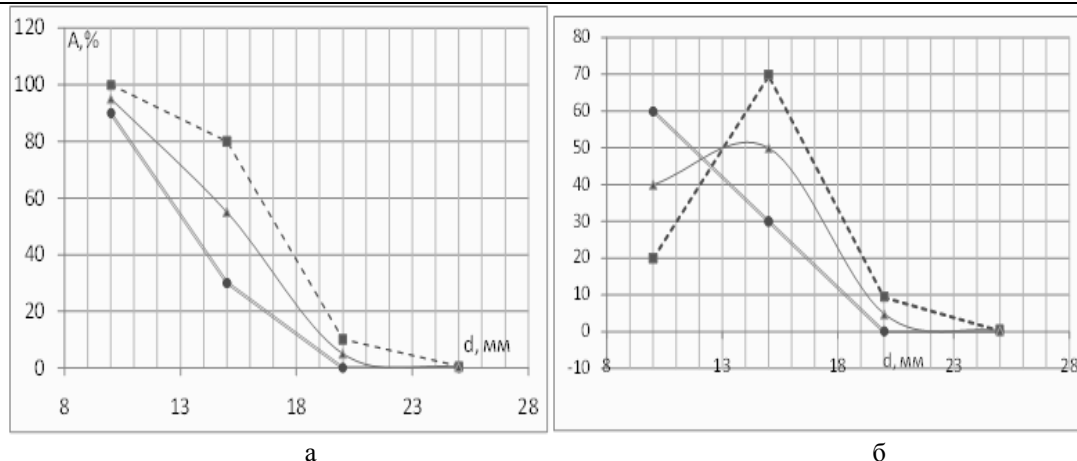


Рис. 6. Криві гранулометричного складу фракції 10-20мм

а – повний залишок на ситі ; б - залишок на ситі

— - нижня межа; - - - - верхня межа; ——— - середнє значення.

Представлені розподіли гранулометричного складу дозволяють визначити кількість і розміри часток  $D_i$ , які утворюють скелет будівельної суміші. Так для суміші складом  $Ц = 471 \text{ кг}$ ,  $B = 167 \text{ л}$ ,  $\Pi = 1177 \text{ кг}$ ,  $\Sigma = 631 \text{ кг}$  гранулометричний аналіз і енергія ущільнення для  $1 \text{ м}^3$  суміші представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

## Гранулометричний склад і енергія ущільнення

№ діапазону	Крайні значення діапазону $D_{\min}; D_{\max}$ , мм	Середнє значення діапазону $D_i$ , мм	Кількість часток діапазону $n_i$	Енергія ущільнення діапазону $E_{D_i}$ , кДж
1	0,16; 0,315	0,2375	$2,09 \cdot 10^{10}$	6,255
2	0,315; 0,63	0,4725	$2,01 \cdot 10^9$	6,19
3	0,63; 1,25	0,94	$1,74 \cdot 10^8$	3,555
4	1,25; 2,5	1,875	$1,29 \cdot 10^7$	2,092
5	2,5; 5	3,75	$8,05 \cdot 10^5$	1,044
6	10; 15	12,5	$1,74 \cdot 10^5$	8,36
7	15; 20	17,5	$7,92 \cdot 10^4$	10,44
8	20; 25	22,5	$3,54 \cdot 10^3$	0,992
$\Sigma$	-	-	$2,31 \cdot 10^{10}$	37,884

Аналіз отриманих даних свідчить про високу енергоємність процесу ущільнення нижніх класів дрібного заповнювача, що викликано великою кількістю утворених контактів частинок даної групи. Найбільша кількість енергії ущільнення крупного заповнювача припадає на діапазон 15-20 мм, що пов'язано з різким зростанням довжини траєкторії точки контакту.

При використанні методики розрахунку роликового бетоноформуєчого агрегату для пустотних виробів [5] для ущільнення  $1 \text{ м}^3$  бетонної суміші з реологічними властивостями близької до наведеної обхідно витратити  $2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$ , що за виразом ефективності процесу ущільнення (1) складає 1,6 %. Для випадку вібраційного ущільнення пустотної плити на вібромайданчику СМЖ -187Б енергетичні витрати ущільнення  $1 \text{ м}^3$  складають  $7,2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$ , що відповідає ефективності процесу ущільнення рівним 0,53 %.

### Висновки

Визначення питомої енергії процесу ущільнення цементної суміші дозволяє визначити енергетичну ефективність використання технологічних процесів при виготовленні будівельних споруд, конструкцій і виробів.

### Література

1. Технология и свойства тяжелых бетонов [Текст] / Госстрой СССР. НИИЖБ ; под ред. А.Е. Десова. - М. : Стройиздат, 1971. - 207 с.
2. Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей [Текст] : [Учеб. пособие для вузов по спец. "Строит. и дор. машины и оборуд." "Пр-во строит. изделий и конструкций"] / Ю.Ф. Чубук, И.И. Назаренко, В.Н. Гарнец. - Киев : Вища шк., 1985. - 167 с.
3. Базарбаев, Н. Энергетика технологических процессов в строительном производстве / Н. Базарбаев, Д.М. Ярошев. – Ташкент : Фан, 1980. – 111 С.
4. Рюшин В.Т. Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – К., 1986.
5. Контактна взаємодія робочих органів безвібраційних бетоноформуючих агрегатів при виробництві пустотних панелей: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.02 / С.В. Зайченко; Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. — К., 2001. — 19 с.
6. Ловейкін В.С. Визначення контактних тисків взаємодії формуючих робочих органів прохідницького щита з оброблюваним середовищем/В.С. Ловейкін, С. П. Шевчук , С. В. Зайченко // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. - Мелітополь: ТДАТУ, 2011. - №3. - .-С. 272-273.
7. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона. — М.: Стройиздат, 1981— 464 с.
8. Сильченко И. Г. Водопотребность песка в составе цемент-но-песчаного бетона. — В сб.: Строительные материалы, детали и изделия. Киев, 1973, вып. XVII.
9. СН 322-74. Указания по производству и приемке работ по строительству в городах и на промышленных предприятиях коллекторных тоннелей, сооружаемых способом щитовой проходки. – М: Госстрой СССР, 1973. – 24 с.